

04;10;11

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ОТКРЫТОГО РАЗРЯДА

© А.Р.Сорокин

Открытый разряд (ОР) с сетчатым анодом является разновидностью затрудненного разряда. В отличие от всех известных форм тлеющего разряда, где фотоэмиссия не играет определяющей роли, в ОР, как считается [1-7], формирование разряда, его поддержание и основная поставка электронов пучка обеспечиваются фотоэмиссией с катода. Чтобы подчеркнуть это отличие, когда в период формирования ОР электрический пробой в обычном понимании как бы отсутствует, в [2] переход ОР в искровую стадию назван самопробоем. Однако в [8] фотоэлектронная природа ОР подвергнута сомнению, а роль фотоподсветки из дрейфового пространства (ДП) сведена к обеспечению однородности эмиссии электронов с катода во время формирования разряда. Заметим, что в одних работах развитие ОР начинается с появлением анодного тока I_a [3], в других, напротив, подчеркивается [4], что никогда развитие I_a не опережает тока коллектора I_c .

Для более точного определения характера развития разряда и роли фотоэмиссии в нем необходим комплексный подход к изучению динамики ОР, который и лег в основу предлагаемой работы.

Проведенные исследования позволили выделить 5 стадий ОР, каждая из которых имеет свои особенности.

Первая — предпробойная ($I \lesssim 10^{-4}$ А/см²). Условия в этой стадии, в первую очередь интенсивность фотоподсветки катода из ДП, и определяют в основном дальнейший характер протекания разряда: его однородность, величину и стабильность задержки пробоя. Поскольку объем ДП может в 100 раз и более превышать объем самого промежутка, то во столько же раз (в коаксиальной конструкции) будет выше фотоподсветка по сравнению с разрядом со сплошными электродами. Это стабилизирует сильноточную фазу ОР и позволяет получать большие токи без его перехода в дугу.

Вторая — предвысоковольтный разряд. Она близка по форме к обычному высоковольтному разряду, но присуща только ОР, включая разряд с полым анодом (частный случай ОР с "сеткой" в одно отверстие). Такой разряд поддерживается за счет ионизации газа в слабом поле, происходящем в полостях анодной сетки. В этом случае разряд

на перемычки сетки практически отсутствует, поэтому эффективность генерации электронного пучка (ЭП) не зависит от геометрической прозрачности сетки, определяется непосредственно процессами в разряде и может составлять величину, близкую к 100%. В обычно используемых режимах работы ОР эта стадия или не просматривается вовсе, или ток в ней ($\sim 0.1 \text{ A/cm}^2$) не превышает нескольких процентов от амплитудного значения. Что касается влияния фотоподсветки на предвысоковольтный разряд, а также на последующие стадии ОР, то ощутимого ее влияния в опытах обнаружено не было.

Третья — высоковольтный тлеющий разряд. В процессе перехода к этой стадии электрическое поле в промежутке все более искажается объемными зарядами. Улучшаются условия для ионизации в ослабленном поле прианодной области и начинает формироваться разряд на перемычки сетки. Теперь часть ЭП перехватывается сеткой, и эффективность прохождения ЭП падает вплоть до величины, близкой к геометрической прозрачности сетки.

Дальнейшее развитие разряда приводит к формированию катодного падения потенциала и переходу к четвертой стадии — аномальному разряду. Эта стадия подробно исследована в [9], где с привлечением известных экспериментальных данных показано, что ОР может быть описан в рамках модели обычного аномального разряда. Очевидно, в случае фотоэлектронного ОР такого совпадения быть не может.

Последняя, пятая стадия — дуговой разряд. Это результат обычного перехода аномального разряда в дуговой.

Развитие ОР подбором условий можно остановить на любой из перечисленных стадий в непрерывной или квазинепрерывной форме, что существенно облегчает проведение исследований каждой из этих стадий в отдельности.

На рис. 1 представлены примеры, иллюстрирующие предвысоковольтную стадию (а) и начало перехода в высоковольтную (б). При анализе осциллограмм необходимо учитывать влияние межэлектродной емкости. В вакууме, после ее зарядки, в анодной цепи регистрируется ток ее разряда I_a^0 . Как видно, в обоих случаях I_c опережает I_a , а эффективность генерации ЭП $\eta = I_c / (I = I_a + I_c)$ близка к 100% и превышает геометрическую прозрачность сетки $\tau \approx 60\%$.

Уменьшение длины пространства дрейфа L ведет к сокращению объема, из которого идет фотоподсветка катода, и области провисания поля в ДП, поэтому задержка пробоя t_d (рис. 1, а) может определяться тем и другим. Тот факт, что изменение t_d ощущается на больших L , где прови-

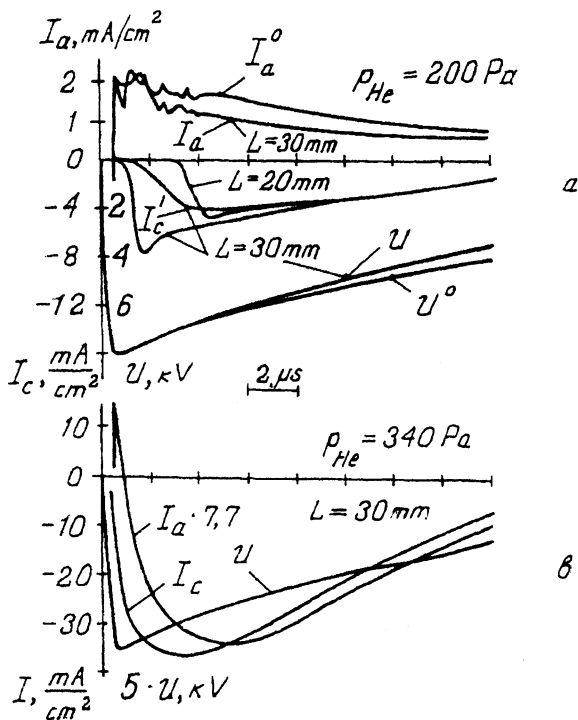


Рис. 1. Осциллограммы напряжения U , токов анода I_a и коллектора I_c при различных давлениях гелия p_{He} и длинах дрейфового пространства: U^0 , I_a^0 — без напуска газа в ячейку; I_a' — при размещении заземленного электрода у ячейки в области дрейфового пространства; промежуток $d = 1 mm$, размер отверстий в сетке $h = 0.4 mm$, прозрачность сетки $\tau = 0.6$, площадь катода $S = 1 cm^2$.

сание несущественно, свидетельствует о влиянии фотоподсветки. Размещение заземленного электрода в области ДП с внешней стороны газоразрядной трубки уменьшает скорость нарастания тока — результат сокращения области провисшего поля. В обоих случаях после переходного процесса осциллограммы I_c совмещаются. Заметим, что и при $L < 20 mm$ скорость нарастания I_c не меняется, а лишь увеличивается t_d и ее нестабильность. Это связано с экранированием коллектора пучком электронов, заряд которых уменьшает провисание. В результате уменьшение L слабо меняет проникновение поля в ДП, а изменяет лишь интенсивность подсветки. Заземленный электрод влияет на область слабого провисания поля, которое в процессе искажения поля зарядами в промежутке исчезает. Непосредственно у сетки провисание определяется размером отверстий в сетке.

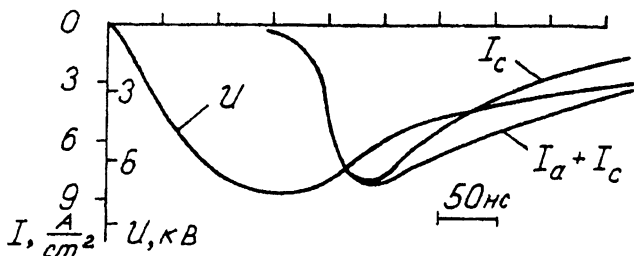


Рис. 2. Осциллограммы, иллюстрирующие разряд в неоне ($p_{\text{He}} = 400$ Па, $d = 0.5$ мм, $h = 2$ мм, $\tau = 0.8$, $S = 1.5$ см²).

Наиболее наглядно переход ОР из одной стадии в другую наблюдается при изменении d . Если зафиксировать давление, например, $p_{\text{He}} = 290$ Па и напряжение $U = 10$ кВ, то по мере роста d меняются стадии ОР и наблюдается сначала плавное нарастание I ($d = 1$ мм — $I = 65$ мА/см²). Начиная с 1.8 формируется аномальная стадия с резким ростом I ($d = 3$ мм — $I = 2$ А/см²). При дальнейшем увеличении d (до 12 мм) ток почти не меняется, а $\eta \approx \tau$. Для фотоэлектронного начала ОР фотоподсветка должна обеспечить коэффициент размножения электронов $k > I$, который будет сохраняться и на последующих стадиях. Тогда амплитудное значение I не должно зависеть от d , как это наблюдается в опыте, а будет определяться известным законом "степени 3/2". Для условий рис. 1, а ($U = 6$ кВ, $d = 1$ мм) $I = (2.34 \cdot 10^{-6} U^{3/2})/d^2 = 110$ А/см², что на 4 порядка превышает экспериментальное значение I . Следовательно, и с этой точки зрения фотоэлектронный механизм ОР не проходит.

Применение ОР ограничивается стадиями высоковольтного и аномального разрядов. Интерес представляет и предвысоковольтный разряд, когда почти отсутствует ток на сетку и при работе в непрерывном режиме или с высокой частотой следования импульсов анод предохраняется от разрушающего действия ЭП. Однако в обычных условиях ток в этой стадии мал. Ясно, что для его повышения необходимо увеличить провисание поля, что и продемонстрировано на рис. 2. Следовательно, для повышения η необходимо увеличивать провисание, а не уменьшать, как это рекомендуется в [2,4]. Заметим, что в [4] факт опережения током коллектора анодного тока, в отличие, например, от [3], также связан с большим провисанием поля. В [4] анод выполнялся в виде натянутых проволочек и область с провисшим полем занимала большую часть сетки, чем в [3].

Таким образом, показано, что ОР представляет собой известные формы тлеющего разряда, а фотоподсветка обеспечивает однородную эмиссию электронов с катода перед началом пробоя. Путем увеличения провисания поля в полостях анодной сетки в стадии предвысоковольтного тлеющего разряда получен сильноточный ЭП с эффективностью $\approx 100\%$, не зависящей от прозрачности сетки.

Список литературы

- [1] Ботан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 1. С. 88–95.
- [2] Kolbychev G. V., Lolbycheva P. D. // SPIE. 1995. V. 2619. P. 96–103.
- [3] Ботан П.А. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 6. С. 61–68.
- [4] Колбычев Г.В., Пташник И.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 104–111.
- [5] Ковалев А.С., Манкелевич Ю.А., Муратов Е.А. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 8. С. 1076–1083.
- [6] Колбычев Г.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–649.
- [7] Arlantsev S. V., Borovich B. L., Buchanov V. V. et al. // J. of Russian Laser Research. 1995. V. 16. N 2. P. 99–119.
- [8] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 20. С. 37–40.
- [9] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 138–142.

Институт физики
полупроводников СО РАН
Новосибирск

Поступило в Редакцию
12 апреля 1996 г.